

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 101 14 963.8

**Anmeldetag:** 27. März 2001

**Anmelder/Inhaber:** Infineon Technologies AG,  
München/DE

**Bezeichnung:** Halbleiterbauelement mit einem semimagnetischen  
Kontakt

**Priorität:** 20.03.2001 DE 101 13 495.9

**IPC:** H 01 L 43/08

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 13. November 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag



Hoß

# MÜLLER & HOFFMANN – PATENTANWÄLTE

European Patent Attorneys – European Trademark Attorneys

Innere Wiener Strasse 17  
D-81667 München

Anwaltsakte: 11194-2

Ko/Rb/rg

Anmelderzeichen: 200104649  
(2001 E 04603 DE)

27.03.2001

## **Infineon Technologies AG**

St.-Martin-Straße 53

81669 München

---

**Halbleiterbauelement mit einem semimagnetischen Kontakt**

---

Priorität: Deutschland / 101 13 495.9 / 20. März 2001

---

Beschreibung

Halbleiterelement mit einem semimagnetischen Kontakt

- 5 Die Erfindung betrifft ein magnetoresistives Halbleiterelement, sowie ein Speicherelement, einen Feldeffekttransistor und einen magnetischen Sensor, wie er insbesondere in Leseköpfen zum Auslesen von in magnetischen Speichermedien gespeicherten Informationen verwendet wird, welche jeweils das magnetoresistive Halbleiterelement umfassen.

Die Magnetoelektronik und der spinpolarisierte Transport von Ladungsträgern haben im letzten Jahrzehnt eine rasante Entwicklung durchgemacht. Diese Entwicklung wurde vor allem  
15 durch die Entdeckung des sogenannten Giant Magnetowiderstands (GMR) und des Tunnelmagnetowiderstands (TMR) ausgelöst. Diese beiden Effekte ermöglichten es erstmals, ein Magnetfeld, bzw. eine Magnetisierungsinformation direkt in eine Widerstandsänderung umzusetzen. Beide Effekte basieren auf dem Transport  
20 spinpolarisierter Elektronen zwischen zwei ferromagnetischen Kontakten, wobei die relative Magnetisierung der beiden Kontakte ausschlaggebend für den Widerstand des Gesamtbaulements ist. Der GMR wird hierbei in rein metallischen Strukturen und der TMR in Strukturen mit einer oxidischen Tunnelbarriere zwischen zwei ferromagnetischen Metallschichten genutzt.  
25 Zur Zeit werden TMR-Strukturen für elektronisch auslesbare Magnetspeicher MRAM verwendet, während der GMR kommerziell vor allem in der Magnetfeldsensorik und in Festplattenleseköpfen genutzt wird.

30 Beim GMR wird in einem rein metallischen Bauelement mit zwei ferromagnetischen Kontakten, zwischen denen eine Schicht eines nichtmagnetischen metallischen Leiters angeordnet ist, die Widerstandsänderung zwischen paralleler und antiparalleler  
35 Magnetisierung gemessen. Bei Anlegen eines externen Felds

und damit paralleler Ausrichtung der Magnetisierungen in benachbarten ferromagnetischen Schichten sinkt der Widerstand des Bauelements. Die Impedanz eines solchen Elements ist aufgrund der metallischen Leitfähigkeit schwer an Halbleiterschaltungen anzupassen was die Integration von GMR-Strukturen in solche Schaltungen erschwert.

1999 gelang R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A. Waag und L. W. Molenkamp (Nature 402, 787 - 790 (1999)) der Nachweis der Injektion spinpolarisierter Elektronen in einen nichtmagnetischen Halbleiter durch Messung der zirkularen Polarisation des von einer Licht emittierenden Diode erzeugten Lichts. Die Polarisierung der Elektronenspins wurde erreicht, indem die Elektronen über einen  $\text{Be}_{0,07}\text{Mn}_{0,03}\text{Zn}_{0,9}\text{Se}$ -Halbleiterkontakt in einen GaAs-Halbleiter injiziert wurden. Durch Rekombination mit unpolarisierten Löchern, welche von der gegenüberliegenden Seite der Schicht des GaAs-Halbleiters injiziert wurden, wurde zirkular polarisiertes Licht erzeugt.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein magnetoresistives Halbleiterelement zur Verfügung zu stellen, welches den Nachweis auch sehr schwacher Magnetfelder ermöglicht, eine deutliche Änderung des Widerstands unter Einwirkung eines äußeren Magnetfelds zeigt (Steigerung von  $\Delta R/R$ ) und eine hohe Sensitivität  $S$  aufweist ( $S = \Delta R/R/\Delta H$ ).

Die Aufgabe wird gelöst durch ein magnetoresistives Halbleiterelement, umfassend einen ersten Kontakt und einen zweiten Kontakt, sowie eine zwischen dem ersten und dem zweiten Kontakt angeordnete Schicht eines nichtmagnetischen Halbleiters, wobei der erste Kontakt aus einem semimagnetischen Material besteht.

Bei dem erfindungsgemäßen Halbleiterelement erfolgt der Ladungstransport vom ersten Kontakt zum zweiten Kontakt entweder nur durch Elektronen oder nur durch Löcher. Die Ladungsträger treten also durch den ersten semimagnetischen Kontakt in den nichtmagnetischen Halbleiter ein und werden am zweiten Kontakt wieder aus dem nichtmagnetischen Halbleiter extrahiert. Das erfindungsgemäße Halbleiterelement unterscheidet sich also von der oben beschriebenen LED bereits, dass bei dieser von einem ersten Kontakt spinpolarisierte Elektronen in den nichtmagnetischen Halbleiter injiziert werden, diese im nichtmagnetischen Halbleiter aber mit unpolarisierten Löchern, die vom zweiten Kontakt in den nichtmagnetischen Halbleiter injiziert werden unter Emission von Licht rekombinieren. Der Ladungstransport in der Diode erfolgt also sowohl durch Elektronen wie auch durch Löcher. Im Gegensatz zu der oben beschriebenen Diode findet beim erfindungsgemäßen Halbleiterelement der Ladungstransport im Halbleiter nur durch Elektronen oder nur durch Löcher statt. Die beiden Halbleiterelemente basieren also auf einem unterschiedlichen Ladungstransport. Ferner besitzt das Halbleiterelement bevorzugt eine annähernd lineare I/V-Kennlinie.

Das erfindungsgemäße Bauelement wird zur Widerstandsmessung von einem Strom durchflossen. Es kann mit weiteren Halbleiterelementen kombiniert werden, wobei in diesem Fall der Strom, solange er den Halbleiter nicht verlässt, von nur einer Ladungsträgersorte getragen. Diese Ladungsträger sind bevorzugt Elektronen. Andere Ströme, die im Falle einer Integration im Halbleiter fließen, jedoch nicht der Widerstandsmessung dienen, können auch von der jeweils anderen Ladungsträgersorte getragen werden und in ihrem Strompfad p-n-Übergänge enthalten. Als Halbleiter ist dabei die Strecke des Pfades eines zur Widerstandsmessung verwendeten Stroms von einem ersten metallischen oder metallartigen Kontakt, an dem der Strom in den Halbleiter eintritt, bis zu einem weiteren

metallischen oder metallartigen Kontakt, an dem der Strom den Halbleiter wieder verlässt. Als metallartige Kontakte werden Kontakte betrachtet, die vergleichbare Leitungseigenschaften aufweisen wie metallische Kontakte. Derartige Kontakte bestehen  
5 Beispiel aus Siliziden oder Polysilizium mit einer geeignet hohen Dotierung. In der beschriebenen Ausführungsform ist das magnetoresistive Halbleiterelement also in die vom Halbleiter gebildete Strecke integriert.

10 Eine p-n-Diode hat eine stark nicht-lineare Strom-Spannungscharakteristik. Eine kleine Spannungsänderung kann daher den differentiellen Widerstand  $\Delta V / \Delta I$  stark verändern. Aus diesem Grund wird eine p-n-Diode in einem Stromkreis ,  
15 der zur Messung eines Widerstandes dient, vorzugsweise vermieden.

Bei der von Fiederling et al. beschriebenen Diode wäre ein magnetoresistiver Effekt, wie er für das erfindungsgemäße Halbleiterelement beobachtet wird, auch nicht zu erwarten, da  
20 der Widerstand einer derartigen LED sehr hoch ist und durch ein äußeres Magnetfeld praktisch keine Veränderung des Widerstandes eintritt.

Im Gegensatz zum GMR-Effekt erhöht sich der Widerstand des  
25 Halbleiterelements unter Einwirkung eines externen Magnetfelds, es wird also ein positiver Magnetowiderstand gemessen, der bei vollständiger Polarisierung der Leitungselektronen bis zu 100 % betragen kann. Gemessen wird hierbei die Veränderung des Widerstands zwischen der Magnetisierung 0, d. h. ohne  
30 Einwirkung eines äußeren Magnetfelds, und gleichsinniger Magnetisierung der Spins des Kontakts aus dem semimagnetischen Material unter Einwirkung eines äußeren Felds.

Als Halbleiterelement ist die Integration des erfindungsgemä-  
35 ßen Halbleiterelements in mikroelektronische integrierte

Schaltanordnungen problemlos möglich. Ferner können die erfindungsgemäßen Halbleiterelemente auch problemlos mit anderen elektronischen Elementen kombiniert werden, so dass neuartige Speicherelemente, wie MRAMS, oder Sensoren für Magnetfelder hergestellt werden können. Da ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes die Leitungselektronen unpolarisiert sind und keine Winkelabhängigkeit der Polarisierung der Leitungselektronen im äußeren Magnetfeld auftritt, ist der Ausgangszustand immer wohl definiert. Es ist ferner keine Kopplung der Magnetisierungen von erstem und zweiten Kontakt erforderlich wie in GMR-Strukturen, weshalb die erfindungsgemäßen Halbleiterelemente für eine wesentlich breitere Anwendung zur Verfügung stehen, indem der zweite Kontakt entsprechend modifiziert wird.

Wesentlich für ein magnetoresistives Halbleiterelement ist das Verhältnis der Änderung des Widerstands bei Einwirkung eines äußeren Felds zum Gesamtwiderstand des Elements  $\Delta R/R$ . Für das erfindungsgemäße Halbleiterelement gilt, dass der Gesamtwiderstand des Bauelements nicht wesentlich größer sein darf als die Widerstandsänderung.

Unter einem semimagnetischen Material wird ein Material verstanden, welches einen starken Paramagnetismus aufweist. Während in ferromagnetischen Materialien die Spins gekoppelt sind, also die Leitungselektronen im Allgemeinen bereits ohne Einwirkung eines äußeren Felds eine Polarisierung aufweisen, weist ein semimagnetisches Material ohne Einwirkung eines externen Magnetfelds unpolarisierte Leitungselektronen auf. Die Spins der Elektronen besitzen also keine Vorzugsausrichtung. Beim Anlegen eines externen Magnetfelds werden die Leitungselektronen des Materials spinpolarisiert. Die Spinpolarisation kann z. B. durch eine große Zeeman-Aufspaltung der elektronischen Niveaus hervorgerufen werden. Durch die starke Aufspaltung besetzen die injizierten Elektronen (bzw. Ladungsträger)

das energetisch günstigere untere Zeeman-Niveau. Diese spinpolarisierten Elektronen können anschließend in den nichtmagnetischen Halbleiter injiziert werden.

- 5 Als semimagnetische Materialien können Materialien mit einem großen g-Faktor eingesetzt werden. Der g-Faktor beschreibt den wirksamen Landéfaktor eines Elektrons. Ein großer g-Faktor führt zu einer hohen Zeeman-Aufspaltung der Zustände. Um eine deutliche Änderung des Widerstandes des elektrischen Bauelements beobachten zu können sollte der g-Faktor vorzugsweise größer als 50 sein, insbesondere bevorzugt größer als 200. Geeignet sind z. B. verdünnt magnetische II/VI-Halbleiter. Besonders geeignet sind Halbleiter auf Basis von ZnMnSe. Die Spins des Mangans in undotierten oder n-dotierten ZnMnSe-(II/VI-Halbleitern) sind normalerweise antiferromagnetisch gekoppelt. Bei sehr niedrigen Mn-Konzentrationen und bei niedrigen Temperaturen führt die sp-d-Austauschwechselwirkung zu einem sehr großen g-Faktor von bis zu 100, was zu einer sehr großen Zeeman-Aufspaltung der Zustände für die Leitungselektronen führt. Die magnetischen Mn-Ionen lassen sich isoelektronisch in den Halbleiter einbauen, so dass sich die Leitfähigkeit sowie die Art der Ladungsträger (Elektronen oder Löcher) durch den Einbau von weiteren Dotierungen steuern lässt. Für eine n-Dotierung eignet sich beispielsweise eine Dotierung mit Jod oder Chlor.

- Weiter lassen sich auch III/V-Halbleiter verwenden, wie z. B. GaMnAs in nicht ferromagnetischer Phase oder InSb. Die Dotierung des Halbleiters kann hierbei geeignet durch Be, Si, C, Zn, Te oder S erfolgen. Ferner lassen sich auch schmalbandige Halbleiter wie HgCdTe verwenden. Hier kann, sofern erforderlich, eine Dotierung mit Iod oder Chlor erfolgen. Die angegebenen Dotierungen sind nur als Beispiele aufzufassen. Dem Fachmann sind aus der Halbleitertechnologie vielfältige Do-



tierstoffe bekannt, durch die jeweils eine n- bzw. p-Dotierung erreicht werden kann.

Für die Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters können  
5 prinzipiell alle nichtmagnetischen Halbleiter verwendet werden, z. B. Gruppe IV, III/V und II/VI-Halbleiter. Besonders geeignet ist Silizium sowie Si/SiGe zweidimensionale Elektromengase, da diese eine geringe Spinstreuung aufweisen und nur  
10 geringe Schwierigkeiten bei der Miniaturisierung des erfindungsgemäßen Halbleiterelementes auftreten. Als Dotierungen lassen sich beispielsweise Si, P, As, Sb, B verwenden. Auch diese Dotierungen sind nur als Beispiele aufzufassen. Es können an sich alle für die Dotierung von Halbleitern bekannten Stoffe verwendet werden.

15 Die Änderung des Widerstandes des Halbleiterelementes in einem äußeren Magnetfeld lässt sich insbesondere beobachten, wenn der erste Kontakt und der nichtmagnetische Halbleiter eine vergleichbare elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Die  
20 spezifischen Widerstände  $\rho$  des semimagnetischen Materials und des nichtmagnetischen Halbleiters liegen bevorzugt in einem Bereich von  $10^{-3} - 100 \Omega\text{cm}$ , vorzugsweise  $0,01 - 10 \Omega\text{cm}$ , insbesondere bevorzugt  $0,1 - 1 \Omega\text{cm}$ . Das Verhältnis der spezifischen Widerstände von semimagnetischem Kontakt und nichtma-  
25 gnetischem Halbleiter  $\rho_{\text{semimagn.}} / \rho_{\text{nichtmagn.}}$  liegt bevorzugt in einem Bereich von  $1000 - 0,01$ , vorzugsweise  $100 - 0,1$ . Bevorzugt weist der semimagnetische Kontakt die gleiche oder eine geringere Leitfähigkeit auf als der nichtmagnetischen Halb-  
30 leiter. Die Leitfähigkeit von erstem Kontakt und nichtmagnetischem Halbleiter lässt sich durch eine entsprechende Dotierung aufeinander abstimmen. Das Verhältnis der spezifischen Widerstände des semimagnetischen Materials des ersten Kontakts und des nichtmagnetischen Halbleiters spielt im Wesentlichen dann eine Rolle, wenn im semimagnetischen ersten Kon-  
35 takt keine ideale Spinpolarisierung ( $\sim 100\%$ ) erreicht werden

kann. Bei idealer Spinpolarisierung werden nur spinpolari-  
sierte Ladungsträger in den nichtmagnetischen Halbleiter in-  
jiziert. Die Leitfähigkeit des nichtmagnetischen Halbleiters  
ist dann von untergeordneter Bedeutung.

5

10

15

20

25

30

35

Die beobachtete Änderung des Widerstands lässt sich anschau-  
lich mit dem zwei-Spinkanalmodell veranschaulichen. Für den  
Ladungstransport im nichtmagnetischen Halbleiter stehen zwei  
Kanäle zur Verfügung, wobei in einem Kanal Ladungsträger mit  
paralleler Ausrichtung des Spins zum äußeren Feld und im an-  
deren Kanal Ladungsträger mit antiparalleler Ausrichtung des  
Spins zum äußeren Feld transportiert werden. Der Transport  
der Ladungsträger erfolgt in beiden Kanälen in gleichen An-  
teilen. Ein äußeres Magnetfeld hat daher keinen Einfluss auf  
den Widerstand des nichtmagnetischen Halbleiters. Erfolgt nun  
die Injektion in den nichtmagnetischen Halbleiter über einen  
semimagnetischen Kontakt, erfolgt ohne Einwirkung eines äuße-  
ren Felds der Ladungstransport durch den nichtmagnetischen  
Halbleiter ebenfalls in beiden Spinkanälen zu gleichen Teil-  
len. Wird das Halbleiterelement in ein äußeres Magnetfeld ge-  
bracht, erfolgt in Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfel-  
des eine Aufspaltung der Zeeman-Terme. Die Leitungselektronen  
besetzen dann bevorzugt die energetisch günstigeren Niveaus  
mit einer parallelen Ausrichtung des Spins zum äußeren Ma-  
gnetfeld. Ist die energetische Aufspaltung groß genug, sind  
die Leitungselektronen alle parallel zueinander und zum äuße-  
ren Feld ausgerichtet. Beim Übergang vom semimagnetischen  
Kontakt in den nichtmagnetischen Halbleiter bleibt die Aus-  
richtung der Elektronenspins erhalten. Dies bewirkt eine Un-  
terdrückung eines Spinkanals der Leitfähigkeit im nichtmagne-  
tischen Halbleiter. Während ohne Spin-Injektion der Strom im  
nichtmagnetischen Halbleiter von beiden Spinorientierungen  
(parallel bzw. antiparallel bzw. Spin auf und Spin ab) zu  
gleichen Teilen getragen wird, müssen nun Elektronen einer  
Spinausrichtung den gesamten Strom tragen. Da deren Anzahl

aber nicht nennenswert zunimmt, steigt der Widerstand. Man erhält einen positiven Magnetowiderstand. Im Idealzustand bei vollständiger Spinpolarisierung der Leitungselektronen kann ein Anstieg des Widerstandes im nichtmagnetischen Halbleiter  
5 um 100 % erreicht werden.

Die beobachtete Änderung des Widerstandes beruht auf einem Mechanismus, der sich grundlegend vom Mechanismus der Änderung des Widerstandes in GMR- und TMR-Strukturen unterscheidet. Während beim GMR- und TMR-Effekt die Änderung des Widerstandes durch die Spinpolarisierung des zweiten ferromagnetischen Kontakts bestimmt wird, wird bei dem erfindungsgemäßen Bauelement die Änderung des Widerstands durch eine Verminderung der Besetzung eines Spinkanals im nichtmagnetischen  
10 Halbleiter bewirkt. Es versteht sich jedoch, dass der oben erläuterte Ladungstransport nur eine Modellvorstellung zur Erklärung der beobachteten Widerstandsänderung wiedergibt und auch andere Modelle zur Erklärung herangezogen werden können. Das Modell ist daher nicht als beschränkend für die Erfindung  
15 anzusehen. Letztendlich beruhen die beobachteten Widerstandsänderungen auf Quanteneffekten, die durch anschauliche Modelle nur sehr beschränkt zu beschreiben sind.

Prinzipiell lässt sich das erfindungsgemäße Halbleiterelement auch für den Transport von Löchern anwenden. Durch die starken Wechselwirkungen erfolgt in diesem Fall jedoch eine rasche Depolarisierung der Spins, so dass die beobachteten Effekte nicht so ausgeprägt sind wie beim Ladungstransport durch Elektronen.  
25

Ist die Widerstandsänderung des erfindungsgemäßen Halbleiterelements zumindest in der Größenordnung des Gesamtwiderstands des Bauelementes, so kann das magnetoresistive Halbleiterelement GMR- oder TMR-Strukturen in bestimmten Anwendungen ersetzen. Während für GMR und TMR jeweils zwei ferro-  
30  
35

magnetische Kontakte notwendig sind, ist bei dem erfindungs-  
gemäßen magnetoresistiven Halbleiterelement lediglich ein  
Kontakt aus einem semimagnetischen Material erforderlich,  
dessen Spins ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfelds nicht  
5 polarisiert sind. Das Material des zweiten Kontakts unter-  
liegt zunächst keinen besonderen Beschränkungen. Es ist le-  
diglich erforderlich, dass die Ladungsträger über den zweiten  
Kontakt wieder aus dem nicht magnetischen Halbleiter abflie-  
ßen können.

10 Der Grad der Spinpolarisierung wird nicht nur von der Größe  
des äußeren Magnetfeldes bestimmt, sondern erhöht sich auch  
mit zunehmender Ausdehnung des Kontakts aus dem semimagneti-  
schen Material in Richtung des Ladungsflusses. Die Spinpola-  
15 risierung der Elektronen, also deren Übergang in das untere  
Zeeman-Niveau, erfolgt durch Spinstreuung. Um eine effiziente  
Spinpolarisation zu erreichen, sollte die Dicke der Schicht  
des semimagnetischen Materials daher ein Vielfaches der Spin-  
streulänge betragen. Die Spinstreulänge ist abhängig vom ver-  
20 wendeten Material. Mn-haltige Halbleiter weisen eine starke  
Spinstreuung auf, die eine Spinflüplänge von wenigen Nanome-  
tern erzeugt. Bei Halbleitern wie InSb, die eine geringere  
Spinstreuung aufweisen, ist die Spinflüplänge deutlich grö-  
ßer, weshalb auch deutlich größere Schichtdicken erforderlich  
25 sind. Bei Schichtdicken des semimagnetischen Kontaktes im Be-  
reich von 3 nm lässt sich im Allgemeinen annähernd keine  
Spinpolarisierung und damit nahezu keine Änderung des Wider-  
standes des erfindungsgemäßen Halbleiterelements im äußeren  
Magnetfeld beobachten. Geeignete Schichtdicken des ersten  
30 Kontakts liegen in Abhängigkeit vom verwendeten Material be-  
vorzugt im Bereich von 10 bis 1000 nm, vorzugsweise 50 bis  
300 nm.

Der Aufbau des erfindungsgemäßen magnetoresistiven Halbleiterelements lässt sich in weiten Grenzen variieren, was dem Weg zu einer Vielzahl von Anwendungen öffnet.

- 5 Nach einer bevorzugten Ausführungsform ist zwischen dem ersten Kontakt aus dem semimagnetischen Material und der Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters eine Tunnelbarriere angeordnet. Die Schichtdicke der Tunnelbarriere liegt im Allgemeinen in einem Bereich von 3 bis 7 nm. Die Tunnelbarrieren können entweder aus Halbleitern bestehen, wie AlAs oder GaAs, oder oxidisch sein, wie z. B. Aluminiumoxid, Magnesiumoxid, Titanoxid, Siliziumoxid. Geeignet sind z. B. auch Schichten aus Siliziumnitrid. Es können hier die üblichen Materialien verwendet werden, wie sie zum Beispiel für Halbleitertunnelbarrieren aus resonanten Tunnelnioden bekannt sind. Durch die Tunnelbarriere lässt sich die Effizienz der Spininjektion in den nichtmagnetischen Halbleiter erhöhen. Bei gleicher Spinpolarisierung im semimagnetischen Kontakt lässt sich bei Verwendung einer Tunnelbarriere die Spinpolarisation im nichtmagnetischen Halbleiter erhöhen.

- Wie bereits weiter oben erläutert, ist es für eine Änderung des Widerstandes bei Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes bereits ausreichend, dass der erste Kontakt aus einem semimagnetischen Material besteht. Über den zweiten Kontakt erfolgt notwendigerweise lediglich die Extraktion der Ladungsträger aus dem nichtmagnetischen Halbleiter. Der zweite Kontakt unterliegt daher an sich keinen besonderen Beschränkungen. Durch eine geeignete Wahl des Materials für den zweiten Kontakt lassen sich jedoch Bauelemente für spezielle Anwendungen entwickeln oder es lässt sich die beobachtete Änderung des Widerstands im externen Magnetfeld modifizieren.

- Nach einer Ausführungsform besteht der zweite Kontakt aus einem nicht-magnetischen Material. Es können alle nichtmagnetischen

sche Halbleiter sowie die auch Metalle verwendet werden. Beispiele für geeignete Metalle sind Al, Cr, Ti, Pt, Ni, Au/Ge-Legierungen. Bevorzugt sind die Kontakte aus Materialien mit linearer I/V-Kennlinie, welche einen niedrigen Kontaktwiderstand erzeugen. Die Änderung des Widerstands im externen Magnetfeld wird dann nur durch die Polarisierung der in den Halbleiter injizierten Ladungsträger, insbesondere Elektronen, bewirkt.

- 10 Bevorzugt besteht der zweite Kontakt jedoch auch aus einem semimagnetischen Material. Der zweite Kontakt kann dabei aus den gleichen Materialien aufgebaut sein wie der erste Kontakt, es können jedoch auch unterschiedliche semimagnetische Materialien verwendet werden. Der Ladungstransport im erfindungsgemäßen Halbleiterelement findet wegen der geringen Abmessungen des Halbleiterelements im diffusiven Bereich statt. Die Spinpolarisation ist daher nicht von der Stromrichtung abhängig. Die Elektronen bewegen sich im Mittel zwar in eine bestimmte Richtung, dieser Bewegung ist aber eine statistische Bewegung überlagert. Die Elektronen bewegen sich also in allen möglichen Richtungen und werden dabei gestreut. Wird daher als zweiter Kontakt ebenfalls ein semimagnetischer Kontakt verwendet, ist dies gleichbedeutend mit zwei hintereinander geschalteten Elementen welche aufgebaut sind aus einem ersten Kontakt aus einem semimagnetischen Material, einem nichtmagnetischen Halbleiter und einem zweiten Kontakt aus einem nichtmagnetischen Material, also der oben beschriebenen Ausführungsform entsprechen. In diesem Fall würde sich der Gesamtwiderstand  $R$  zusammensetzen aus  $2 \times R$  (semimagnetischer Kontakt) +  $2 \times R$  (nichtmagnetischer Halbleiter) +  $2 \times R$  (nichtmagnetischer Kontakt). Bei einer Ausführung des zweiten Kontakts als semimagnetischer Kontakt erniedrigt sich der Gesamtwiderstand  $R$  auf  $2 \times R$  (semimagnetischer Kontakt) +  $2 \times R$  (nichtmagnetischer Halbleiter), während die erreichbare Änderung des Widerstandes  $\Delta R$  im äußeren Magnetfeld gleich

bleibt. Dadurch vergrößert sich  $\Delta R/R$ , d.h. die Empfindlichkeit des Halbleiterelements steigt.

5 Nach einer bevorzugten Ausführungsform kann zwischen dem nichtmagnetischen Halbleiter und dem zweiten semimagnetischen Kontakt ebenfalls eine Tunnelbarriere angeordnet sein. Die Tunnelbarriere kann dabei aus den gleichen Materialien hergestellt sein, wie oben beschrieben.

10 Nach einer speziellen Ausführungsform des magnetoresistiven Halbleiterelements besteht der zweite Kontakt aus einem ferromagnetischen Material. Man erhält in diesem Fall ebenfalls ein Halbleiterelement mit einem positiven Magnetowiderstand. Die Kennlinie ist jedoch bis zum Erreichen der Koerzitivfeldstärke des Ferromagneten asymmetrisch. Der ferromagnetische Kontakt injiziert ebenfalls spinpolarisierte Elektronen. Diese weisen jedoch bis zum Überschreiten des Koerzitivfeldes immer nur eine Vorzugsrichtung auf, die unabhängig von der Ausrichtung des äußeren Magnetfeldes ist. Weisen erster und  
20 zweiter Kontakt einen Abstand auf, der geringer ist als die Spinflüplänge, so beeinflusst der ferromagnetische Kontakt die Spininjektion aus dem semimagnetischen Kontakt. Hiermit lässt sich ein polaritätssensitiver Magnetfeldsensor herstellen, indem beispielsweise zwei Halbleiterelemente zusammengeschaltet werden, deren Polarisierung des ferromagnetischen Kontakts um  $180^\circ$  gegeneinander gedreht ist. Es sind viele Anwendungen denkbar, bei denen nicht nur die Größe, sondern auch die Richtung eines Magnetfeldes gemessen werden soll. Eine mögliche Anwendung eines derartigen Halbleiterelements  
30 ist beispielsweise in einem Sensor, mit dem der Einschlagwinkel der Steuerung eines Kraftfahrzeuges gemessen werden soll.

Auch bei einer Ausführung des zweiten Kontakts aus einem ferromagnetischen Material können zwischen erstem Kontakt und  
35 nichtmagnetischem Halbleiter bzw. nichtmagnetischem Halblei-

ter und ferromagnetischen zweiten Kontakt jeweils Tunnelbarrieren angeordnet sein.

Das erfindungsgemäße magnetoresistive Halbleiterelement lässt sich für eine Vielzahl von Anwendungen einsetzen. Beispielsweise ist eine Anwendung zur Informationsspeicherung oder für logische Schaltungen möglich. Ebenso kann das erfindungsgemäße Halbleiterelement z.B. in Sensoren eingesetzt werden.

Gegenstand der Erfindung ist daher auch ein Speicherelement, welches das oben beschriebene magnetoresistives Halbleiterelement umfaßt, sowie ein benachbart zu diesem Element angeordnetes ferromagnetisches Element. Die Anordnung ist dabei so gewählt, dass sich der semimagnetische Kontakt im Streufeld des ferromagnetischen Elements befindet. Bei Drehung der Magnetisierung des ferromagnetischen Elements um  $90^\circ$  erniedrigt sich der Widerstand des magnetoresistiven Halbleiterelements, da sich der semimagnetische Kontakt dann nicht mehr im Streufeld des ferromagnetischen Elements befindet. Die beiden Zustände mit hohem bzw. niedrigem Widerstand lassen sich dann beispielsweise den Zuständen 0 und 1 zuordnen. Im Gegensatz zu den bekannten MRAMs muss die Magnetisierung nur gedreht werden, was einfacher zu erreichen ist als ein Umklappen der Magnetisierung um  $180^\circ$ . Der elektrische Teil ist nur aus Halbleitermaterialien aufgebaut und lässt sich daher einfach in mikroelektronische Schaltkreise integrieren. Bei einer Anordnung in einer Matrix lässt sich das Element z.B. durch Schottky-Dioden von anderen Elementen entkoppeln.

Das erfindungsgemäße magnetoresistive Halbleiterelement lässt sich auch als Feldeffekttransistor ausgestalten. Der Feldeffekttransistor umfaßt eine Source-Elektrode, eine Drain-Elektrode, sowie eine Gate-Elektrode, wobei zumindest ein erster Kontakt aus einem semimagnetischen Material vorgesehen ist, durch den spinpolarisierte Ladungsträger in die Source-



Elektrode und/oder die Drain-Elektrode injiziert bzw. extrahiert werden. Es steht damit bei gleicher Baugröße ein Bauelement erhöhter Komplexität zur Verfügung. So lässt sich zum Beispiel das oben beschriebene Speicherelement direkt in einen Feldeffekttransistor integrieren. Der Ladungstransport von Source nach Drain erfolgt dabei nur durch eine Sorte von Ladungsträgern. Unter dem Einfluss des von der Gateelektrode erzeugten Felds entsteht im Halbleiter zwischen Source und Drain ein Leitungskanal, in dem Ladungstransport durch Elektronen erfolgt.

Das erfindungsgemäße Halbleiterelement kann auch in einen bipolaren Transistor integriert werden. Der bipolare Transistor umfasst einen als Emitter wirkenden Abschnitt, einen als Kollektor wirkenden Abschnitt und einen zwischen diesen angeordneten, als Basis wirkenden Abschnitt, wobei zumindest ein erster Kontakt vorgesehen ist, durch den spinpolarisierte Ladungsträger in den Emitter und/oder aus dem Kollektor injiziert bzw. extrahiert werden.

Bevorzugt ist der bipolare Transistor als npn-Transistor ausgestaltet. Die Spinpolarisierung der Ladungsträger, vorzugsweise Elektronen, erfolgt im ersten Kontakt, der bevorzugt aus einem semimagnetischen Material aufgebaut ist. Der für die Beobachtung des magnetoresistiven Effekts verwendete Strom vom Emitter zum Kollektor wird nur durch eine Ladungsträgersorte, vorzugsweise Elektronen, bewirkt.

Weiter kann das magnetoresistive Halbleiterelement als Sensor für Magnetfelder eingesetzt werden. Bevorzugt ist dabei eine Ausführung als Lesekopf zum Auslesen von in magnetischen Speichermedien gespeicherten Informationen. Ein solches magnetisches Speichermedium kann z.B. eine Harddisk sein. Ein derartiger Sensor umfasst dabei das oben beschriebene magnetoresistive Halbleiterelement, eine elektrische Zu- und Ab-

leitung zu dem ersten bzw. vom zweiten Kontakt sowie eine Messvorrichtung zur Messung der Änderung des Widerstands, die mit der Zu- und Ableitung verbunden ist.

- 5 Das erfindungsgemäße Halbleiterelement zeigt bei Einwirkung eines äußeren Magnetfelds eine Änderung seines Widerstands und kann daher, wie beschrieben, als Sensor zur Detektion von Magnetfeldern eingesetzt werden. Gegenstand der Erfindung ist daher auch ein Verfahren zur Messung der Stärke eines Magnetfeldes, wobei das Magnetfeld auf einen Sensor einwirkt, in dem Ladungsträger in einem ersten Kontakt spinpolarisiert werden, die spinpolarisierten Ladungsträger in einen nichtmagnetischen Halbleiter injiziert werden, und die Ladungsträger aus dem nichtmagnetischen Halbleiter in einen zweiten Kontakt  
15 extrahiert werden und die Änderung des Widerstandes gegenüber einem Ausgangszustand gemessen wird.

Geeignet wird der Ausgangszustand durch einen Widerstand des Sensors ohne Einwirkung eines Magnetfeldes gebildet.

20

- Um eine Änderung des Widerstandes messen zu können, darf der Ladungstransport innerhalb des Halbleiters nur durch eine Ladungsträgersorte erfolgen, also entweder nur durch Elektronen oder nur durch Löcher. Findet im Ladungstransport innerhalb  
25 des nichtmagnetischen Halbleiter ein Wechsel der Ladungsträger statt, führt dies zu einem großen Spannungsabfall und damit zu einem starken Anstieg des Widerstandes weshalb eine Änderung des Widerstandes nicht mehr beobachtet werden kann. Ein solcher Wechsel der Ladungsträger findet beispielsweise  
30 am p-n-Übergang einer Diode statt. Eine Anordnung mit einer Diode kann daher nicht für das erfindungsgemäße Verfahren verwendet werden.

- Wegen der geringen Spinlebensdauer ist die Durchführung des  
35 oben beschriebenen Verfahrens bei einem Ladungstransport

durch Löcher vergleichsweise schwierig technisch zu realisieren. Die Spinzustände von Elektronen weisen eine wesentlich längere Lebensdauer auf, weshalb das Verfahren bevorzugt mit Elektronen als Ladungsträger durchgeführt wird.

5

Weiter ist auch eine Anwendung zur Bestimmung einer Spinausrichtung (z. B. in einem Quantenpunkt) durch Projektion des Spins auf die Quantisierungsrichtung des Halbleiters möglich. Der Quantenpunkt stellt hierbei den zweiten Kontakt dar. Dieser befindet sich in einem Abstand vom ersten Kontakt, der geringer ist als die Spinflüplänge. Der semimagnetische Kontakt, dessen Spinausrichtung durch ein externes Magnetfeld definiert wird, beispielsweise durch einen Magneten, bestimmt die Spinausrichtung des nichtmagnetischen Halbleiters, auf den der Spin des Quantenpunkts projiziert wird. Diese Anwendung ist insbesondere im Zusammenhang mit Quanten-Computing von Interesse.

15

20

Die Erfindung wird unter Bezugnahme auf eine beigefügte Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt:

Fig. 1 eine lineare Anordnung des erfindungsgemäßen Halbleiterelements;

25

Fig. 2 eine Anordnung mit horizontaler Stromrichtung zwischen den Kontakten;

30

Fig. 3 ein Diagramm, in der die Änderung des Widerstandes eines erfindungsgemäßen Halbleiterelements in Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes aufgetragen ist;

35

Fig. 4 ein Diagramm, in der die Änderung des Widerstandes in Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes für eine einzelne Schicht eines hoch n-dotierten  $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Mn}_{0,06}\text{Se}$  gezeigt ist;

Fig. 5 eine Anordnung mit horizontaler Stromrichtung zwischen den Kontakten;

5 Fig. 6 eine Anordnung mit gemischter Stromrichtung zwischen den Kontakten;

Fig. 7 eine Anordnung mit gemischter Stromrichtung zwischen den Kontakten;

10

Fig. 8 eine Seitenansicht (a) und eine Aufsicht (b) eines Speicherelements;

15 Fig. 9 einen Schnitt durch einen Feldeffekttransistor, welcher ein erfindungsgemäßes Halbleiterelement umfasst;

Fig. 10 einen Schnitt durch einen bipolaren Transistor, welcher das erfindungsgemäße Halbleiterelement umfasst;

20 Fig. 11 einen Längsschnitt durch einen Lesekopf, welcher ein erfindungsgemäßes Halbleiterelement umfasst;

25 Fig. 12 ein erfindungsgemäßes Halbleiterelement, welches durch eine Schottky-Diode von benachbarten Halbleiterelementen entkoppelt ist;

30 Fig. 1 zeigt eine lineare Anordnung des erfindungsgemäßen Halbleiterelements, in der die einzelnen Schichten sandwichartig nebeneinander angeordnet sind. Über einen ersten Kontakt 1 werden Elektronen in einen nicht-magnetischen Halbleiter 2 injiziert, durchlaufen diesen und werden am zweiten Kontakt 3 wieder extrahiert. Zwischen erstem Kontakt 1 und zweitem Kontakt 2 liegt ein Potential 4 an. Im nichtmagnetischen Halbleiter 2 erfolgt der Transport der Elektronen mit  
35 zwei unterschiedlichen Spinrichtungen, nämlich Spin auf (5,

parallel) und Spin ab (6, antiparallel), die Ladung wird also in zwei Spinkanälen transportiert. Ohne äußeres Magnetfeld erfolgt der Transport der Elektronen in beiden Spinkanälen 5, 6 zu gleichen Teilen. Wirkt ein äußeres Feld 7 auf das Halbleiterelement ein, erfolgt eine Aufspaltung der Zeeman-Terme der Elektronen im ersten Kontakt 1 und die Elektronen besetzen bevorzugt den energetisch günstigeren Zustand 5 (parallel), während die Besetzung des energetisch ungünstigeren Zustands (6, antiparallel) abnimmt. Die in den nichtmagnetischen Halbleiter 2 übertretenden Elektronen sind daher spinpolarisiert. Diese diffundieren durch den nichtmagnetischen Halbleiter 2, wobei sie innerhalb der Spinflüplänge ihre Polarisation beibehalten. Es wird daher nur ein Spinkanal zum Ladungstransport verwendet, weshalb der Widerstand des Elements ansteigt.

Um eine Änderung des Widerstands des Halbleiterelements im Magnetfeld beobachten zu können, ist es nicht erforderlich, dass erster Kontakt 1, nicht-magnetischer Halbleiter 2 und zweiter Kontakt 3 sandwichartig linear nebeneinander angeordnet sind. Eine für die praktische Umsetzung des erfindungsgemäßen Halbleiterelements geeignete Anordnung ist in Fig. 2 gezeigt. Hierbei sind der erste Kontakt 1 und der zweite Kontakt 3 auf der Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters 2 angeordnet. Zwischen erstem Kontakt 1 und zweitem Kontakt 3 liegt wiederum das Potential 4 an. Der nicht-magnetische Halbleiter 2 ist auf einem isolierenden Substrat 8 angeordnet. Diese Anordnung wurde auch für die Durchführung der im weiteren beschriebenen Experimente gewählt.

Die Anordnung aus Fig. 2 wird erhalten, indem auf einem isolierenden GaAs-Substrat 8 eine 500 nm starke Schicht eines n-dotierten ( $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )  $\text{Zn}_{0,97}\text{Be}_{0,03}\text{Se}$ -Halbleiters 3 als nichtmagnetische Halbleiterschicht 2 abgeschieden wurde. Die n-Dotierung wurde dabei mit Iod durchgeführt. Die Abscheidung

der Schicht des nicht-magnetischen Halbleiters 2 erfolgte durch Molekularstrahlepitaxie. Zur Herstellung der Kontakte 1, 3 wurde auf der Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters 2 eine semimagnetische Schicht aus  $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Mn}_{0,06}\text{Fe}$  ( $n = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) abgeschieden. Die Leitfähigkeit der Schicht wurde durch Dotierung mit Iod eingestellt.

Auf dieser semimagnetischen Schicht wurde eine Aluminiumschicht in einer Stärke von 100nm abgeschieden und auf dieser lithographisch Kontakte ( $200\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$ ) definiert um einen Kontakt zu den semimagnetischen Kontakten 1, 3 herzustellen. Diese lithographisch definierten Kontaktflächen wurden dann als Ätzmaske für ein nasschemisches Ätzen verwendet, bei dem der semimagnetische Halbleiter und etwa 10 nm der Stärke des nicht magnetischen Halbleiters 2 im unmaskierten Bereich entfernt wurden. In einem zweiten optischen lithographischen Schritt wurde ein erhöhter Bereich (Mesa) definiert, welche die beiden semimagnetischen Kontakte 1, 3 sowie die Schicht des zwischen den Kontakten 1, 3 angeordneten Halbleiters 2 umfasste. Das diesen Bereich umgebende unmaskierte  $\text{Zn}_{0,97}\text{Be}_{0,03}\text{Se}$  wurde anschließend durch nasschemisches Ätzen entfernt, so dass die in Fig. 2 gezeigte Anordnung erhalten wurde.

Nach dem oben beschriebenen Verfahren wurden Halbleiterelemente mit unterschiedlichen Schichtdicken der Kontakte 1, 3 und mit unterschiedlichen Abständen der Kontakte 1, 3 hergestellt.

Die magnetische Widerstandsänderung der verschiedenen Halbleiterelemente wurde bei 4,2 K bei Magnetfeldstärken von 0 bis 7 T bei einer Gleichspannung von 100  $\mu\text{V}$  vermessen. Dabei wurden die Daten nur im linearen Bereich der Änderung des Widerstands gemessen. Sämtliche  $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Mn}_{0,06}\text{Se}/\text{Zn}_{0,97}\text{Be}_{0,03}\text{Se}$  Hybridstrukturen zeigten dabei eine starke positive magneti-

sche Widerstandsänderung. Beispielhafte Kurven der magnetischen Widerstandsänderung sind in Fig. 3 (Kurve (a) und (b)) dargestellt. Die größte beobachtete Änderung des magnetischen Widerstands betrug annähernd  $1,4 \Omega$ , bei einem Gesamtwiderstand der Anordnung von  $20,5 \Omega$ . Subtrahiert man den Kontaktwiderstand von  $2 \Omega$ , kann für die relative Änderung des Widerstands eine untere Grenze von  $\Delta R/R = 8 \%$  abgeschätzt werden. Der Widerstand erreicht bei Feldern zwischen 1 und 2 Tesla eine Sättigungsgrenze. Die beobachtete Änderung des Widerstands ist unabhängig von der Orientierung des Halbleiterelements im magnetischen Feld. Wird die Schichtdicke des ersten und zweiten Kontakts 1, 3 von 200 nm (Fig. 3, Kurve (a)) auf 100 nm (Fig. 3, Kurve (b)) verringert, erniedrigt sich die Widerstandsänderung um den Faktor 3. Ein Halbleiterelement, bei dem die Kontakte aus einem nicht-magnetischen Halbleiter bestanden, zeigt innerhalb einer Messgenauigkeit von 0,2 % keine Änderung des Widerstands im Magnetfeld (Fig. 3, Kurve (c)).

Die Schichten der Anordnung aus Fig. 2 wiesen eine hohe n-Dotierung auf, um sicherzustellen, dass die intrinsische magnetische Widerstandsänderung der Kontakte 1, 3 negativ war. Bei geringer Dotierung (jedoch oberhalb des Übergangs zum Isolator) zeigen die semimagnetischen Kontakte 1, 3 wegen der e-e Korrektur der Leitfähigkeit eine zusätzliche positive magnetische Widerstandsänderung. Dieser Einfluss nimmt mit zunehmender Dotierung  $n$  gemäß  $(k_F l)^{-3/2}$  ab, wobei  $k_F$  der Wellenvektor der Fermi-Energie ist und  $l$  die mittlere freie Weglänge des Elektrons. Die geringe negative magnetische Widerstandsänderung (2 %) einer Probe, die nur aus dem semimagnetischen Material aufgebaut ist, ist in Fig. 3 dargestellt.

Ferner wurde das Ausmaß der Widerstandsänderung in Abhängigkeit vom Abstand der Kontakte 1, 3 bei einer Schichtdicke der Kontakte von 100 nm bestimmt. Die Experimente zeigen, dass

mit zunehmendem Abstand der absolute Wert der positiven magnetischen Widerstandsänderung von  $0,48 \Omega$  ( $10 \mu\text{m}$ ) über  $0,4 \Omega$  ( $20 \mu\text{m}$ ) auf  $0,35 \Omega$  ( $30 \mu\text{m}$ ) abnimmt.

- 5 Die Anordnung der einzelnen Schichten des magnetoresistiven Halbleiterelements kann innerhalb weiter Grenzen modifiziert werden.

10 Eine weitere geeignete Struktur zeigt Fig. 5. In diesem Fall ist jedoch der nichtmagnetische Halbleiter 2 in ein Halbleitersubstrat 8 implantiert. Der leitende Bereich des nichtmagnetischen Halbleiters lässt sich durch Ionenimplantation definieren. Dieses Verfahren ist aus der planaren Siliziumtechnologie bekannt. Die Leitfähigkeit lässt sich durch den Grad  
15 der Dotierung einstellen. Bei n-Dotierung des nichtmagnetischen Halbleiters 2 lässt sich das Halbleitersubstrat 8 p-dotieren. Dadurch kann eine Entkopplung zu benachbarten Elementen erreicht werden, da dann immer einer der p-n-Übergänge sperrt. Da erster Kontakt 1 und zweiter Kontakt 3 gleichzeitig  
20 auf die Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters 2 aufgebracht werden können, ist für die Herstellung der beiden Kontakte 1, 3 nur ein Epitaxieschritt erforderlich.

Eine weitere Ausführungsform wird in Fig. 6 gezeigt. Hierbei  
25 ist der nicht magnetische Halbleiter 2 auf einem Halbleitersubstrat 8 angeordnet und der semimagnetische erste Kontakt 1 als Schicht auf dem nicht magnetischen Halbleiter 2 ausgebildet. Der zweite Kontakt 3, der ebenfalls aus einem semimagnetischen Halbleiter oder auch aus einem nicht magnetischen Material bestehen kann, ist ebenfalls direkt auf dem Halbleitersubstrat 8 angeordnet. Das Halbleitersubstrat 8 kann auch  
30 direkt als zweiter Kontakt im Sinne der Erfindung wirken. Der Ladungstransport erfolgt hierbei durch das Halbleitersubstrat 8. Die Herstellung der gezeigten Halbleiterelemente erfolgt  
35 nach bekannten Verfahren. Geeignet sind zum Beispiel Moleku-



larstrahlepitaxie, Niederdruckgasphasenepitaxie, Atmosphären-  
druckgasphasenepitaxie oder auch UHV-Gasphasenepitaxie.

5 Eine weitere Ausführungsform, die nur einen sehr geringen  
Platzbedarf aufweist, ist in Fig. 7 gezeigt. Dabei ist ein  
zweiter Kontakt 3, der aus einem semimagnetischen Material  
oder einem nicht magnetischen Material bestehen kann, auf dem  
Halbleitersubstrat 8 angeordnet. Das Halbleitersubstrat 8  
kann auch direkt den zweiten Kontakt 3 bilden. Auf dem zwei-  
10 ten Kontakt 3 ist eine Schicht aus einem nichtmagnetischen  
Halbleiter 2 angeordnet, auf dem eine weitere Schicht aus ei-  
nem semimagnetischen Halbleiter angeordnet ist, welche den  
ersten Kontakt 1 bildet. Der Ladungstransport erfolgt dabei  
zum Teil auch über das Halbleitersubstrat 8.

15

In Fig. 8 ist eine Anordnung gezeigt, wie sie für ein Spei-  
cherelement verwendet werden kann. In einem Substrat 8, bei-  
spielsweise ein p-dotiertes Siliziumsubstrat, ist ein n-  
dotierter Bereich implantiert, der den nichtmagnetischen  
20 Halbleiter 2 des erfindungsgemäßen Halbleiterelements bildet.  
Auf dem nicht magnetischen Halbleiter 2 sind nebeneinander  
ein erster semimagnetischer Kontakt 1 angeordnet, der bei-  
spielsweise aus  $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Mn}_{0,06}\text{Se}$  aufgebaut sein kann, sowie  
ein zweiter Kontakt 3, der aus einem nichtmagnetischen Mate-  
25 rial, beispielsweise Aluminium, oder ebenfalls aus einem se-  
mimagnetischen Material, beispielsweise  $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Mn}_{0,06}\text{Se}$ ,  
aufgebaut sein kann. Benachbart zum ersten semimagnetischen  
Kontakt 1 ist ein ferromagnetisches Element 9 angeordnet, das  
beispielsweise aus Kobalt bestehen kann. Die Magnetisierungs-  
30 richtung des ferromagnetischen Elements 9 kann verändert wer-  
den. Erster Kontakt 1 und ferromagnetisches Element 9 sind  
dabei so nahe beieinander angeordnet, dass der erste Kontakt  
1 im Streufeld des ferromagnetischen Elements 9 liegt. Der  
Abstand zwischen semimagnetischem ersten Kontakt 1 und ferro-

magnetischem Element 9 wird geeignet im Bereich von 50 - 100 nm gewählt.

Die Funktion des Speicherelements ist in Fig. 8b dargestellt.

5 Im Zustand mit einem hohen Widerstand liegt der erste Kontakt 1 im Streufeld der Magnetisierung 10 des ferromagnetischen Elements 9. In diesem Zustand werden spinpolarisierte Elektronen aus dem ersten Kontakt 1 in den nichtmagnetischen Halbleiter 2 injiziert, so dass nur einer der Spinkanäle für den Ladungstransport genutzt werden kann. Die Vorrichtung zeigt daher einen erhöhten Widerstand. Wird die Magnetisierung 10 des ferromagnetischen Elements 9 um 90° gedreht (Magnetisierung 11), liegt der erste Kontakt 1 nicht mehr im Streufeld des ferromagnetischen Elements 9. Die vom ersten Kontakt 1 in den nichtmagnetischen Halbleiter 2 injizierten Elektronen werden daher nicht mehr spinpolarisiert, weshalb für den Ladungstransport beide Spinkanäle im nichtmagnetischen Halbleiter 2 genutzt werden können. Dadurch erniedrigt sich der Widerstand des Halbleiterelements.

20 Fig. 9 zeigt eine mögliche Anordnung für einen Feldeffekttransistor. In einem p-dotierten Siliziumsubstrat 8 wird ein erster n-dotierter Bereich 14 definiert, der als Source wirkt, und ein zweiter n-dotierter Bereich 15, der als Drain wirkt. In dem Bereich zwischen Source und Drain ist eine Gateelektrode 12 angeordnet, die durch ein Gatedielektrikum 13 vom Substrat 8 isoliert ist. Auf dem als Source wirkenden n-dotierten Bereich 14 ist ein erster Kontakt 1 aus einem semimagnetischen Material angeordnet. Dieser kann beispielsweise aus  $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Mn}_{0,06}\text{Se}$  aufgebaut sein. Auf dem ersten Kontakt ist eine Metallschicht 16 angeordnet, die beispielsweise aus Aluminium bestehen kann, und durch die dem ersten Kontakt 1 Elektronen zugeleitet werden. Auf dem als Drain wirkenden n-dotierten Bereich 15 ist ebenfalls einer Metallschicht 17 angeordnet, die zum Beispiel ebenfalls aus Aluminium bestehen

kann. Das Halbleiterelement im Sinne der Erfindung wird zunächst vom ersten semimagnetischen Kontakt 1 und dem n-dotierten Bereich 14 gebildet, der als nichtmagnetischer Halbleiter wirkt. Im feldfreien Zustand, wenn also an der Gateelektrode keine Spannung anliegt, fließt kein Strom von Source nach Drain. Es kann daher auch keine Veränderung des Widerstandes im nichtmagnetischen Halbleiter, d.h. im n-dotierten Bereich 14 durch Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes eintreten. Wird an der Gateelektrode 12 eine Spannung angelegt, reichern sich im Feld der Gate 12 Elektronen an und es entsteht ein Leitungskanal 18 im p-dotierten Substrat 8, in dem der Ladungstransport durch Elektronen erfolgt. Der Leitungskanal 18 bildet dann im Sinn der Erfindung den zweiten Kontakt, durch den die Extraktion der Ladungsträger aus dem nichtmagnetischen Halbleiter erfolgt.

In der in Fig. 9 gezeigten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Halbleiterelement an der Source 14 ausgebildet. Es ist jedoch auch möglich das erfindungsgemäße Halbleiterelement an der Drain 15 auszubilden. Ebenso kann sowohl an Source wie an Drain ein erfindungsgemäßes Halbleiterelement ausgebildet sein. Ebenso ist die Konfiguration des FET nicht auf die in Fig. 9 gezeigte Ausführungsform beschränkt.

Fig. 10 zeigt das erfindungsgemäße Halbleiterelement als Bestandteil eines bipolaren Transistors. Gezeigt ist ein npn-Transistor. Der Transistor umfasst einen ersten Kontakt 1 aus einem semimagnetischen Material, beispielsweise ZnBeMnSe. An den ersten Kontakt 1 schließt sich eine Schicht eines nichtmagnetischen Halbleiters 2 an. Diese Schicht ist auf einem n-dotierten Bereich angeordnet, der als Emitter 19 des Transistors wirkt. Unter dem Emitter 19 befindet sich eine dünne p-dotierte Basis 20 des Transistors, an die sich der n-dotierte Kollektor 21 anschließt. Der ohmsche Kontakt zum semimagnetischen ersten Kontakt 1, Basis 20 und Kollektor 21

wird jeweils durch metallische Kontakte 16 hergestellt. Liegt an der Basis 20 eine positive Spannung gegenüber dem Emitter 19 an, so fließt ein Strom durch das Halbleiterelement, der im Bereich der Basis 20 von Elektronen getragen wird, die vom Emitter 19 zum Kollektor 21 diffundieren.

Es ist jedoch auch möglich, dass der Emitter 19 direkt den nichtmagnetischen Halbleiter des erfindungsgemäßen Halbleiterelements bildet. Die vom semimagnetischen Kontakt in den Emitter injizierten spinpolarisierten Elektronen diffundieren dann durch die Basis 20 in den Kollektor 21, sofern auch Elektronen vom Emitter 19 zum Kontakt der Basis 20 fließen. Der Basisstrom selbst wird nicht zur Messung eines Widerstandes genutzt.

Das erfindungsgemäße Halbleiterelement kann auch anschließend an den Kollektor angeordnet sein oder den Kollektor mit umfassen.

Fig. 11 zeigt schematisch den Aufbau eines Lesekopfes, welcher das erfindungsgemäße Halbleiterelement umfasst. Über eine Metallschicht 22, die beispielsweise aus Aluminium bestehen kann, werden die Elektronen einem ersten Kontakt 1 zugeleitet, der aus einem semimagnetischen Material, beispielsweise  $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Mn}_{0,06}\text{Se}$  aufgebaut ist. An den ersten Kontakt 1 schließt sich eine Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters 2 an. Diese kann beispielsweise aus n-dotiertem Silizium aufgebaut sein. Zwischen der Metallschicht 22 und der Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters 2 ist eine Isolierschicht 23, zum Beispiel aus  $\text{SiO}_2$ , vorgesehen. An die Schicht des nichtmetallischen Halbleiters schließt sich eine als zweiter Kontakt 3 wirkende Schicht an, die beispielsweise aus Aluminium bestehen kann. In engem Abstand zum Lesekopf ist ein magnetisches Speichermedium 24 angeordnet, dass unterschiedlich polarisierte Zellen 25 umfasst. Das magnetische Speichermedi-

um kann zum Beispiel eine Harddisk sein. Der aus dem semima-  
gnetischen Material aufgebaute erste Kontakt 1 wird vom Ma-  
gnetfeld der Zellen 25 erfasst, so dass eine Spinpolarisie-  
rung der durch den ersten Kontakt in den nichtmagnetischen  
5 Halbleiter 2 eintretenden Elektronen bewirkt werden kann. Zum  
Auslesen der im magnetischen Speichermedium 24 gespeicherten  
Daten wird dieses am Lesekopf vorbeibewegt. Durch die Polari-  
sierung der einzelnen Zellen 25 ändert sich das äussere Ma-  
gnetfeld, dass auf das semimagnetische Material des ersten  
10 Kontakts einwirkt. Als Folge ändert sich der Grad der Spinpo-  
larisierung der in die Schicht des nichtmagnetischen Halblei-  
ters 2 injizierten Elektronen und damit auch der Widerstand  
des Halbleiterelements. Damit ändert sich die Stärke des  
durch die Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters 2 flie-  
15 senden Stroms. Diese Änderung kann mit einem (nicht darge-  
stellten) Messgerät gemessen werden, das über die Metall-  
schicht 22 mit dem ersten Gerät sowie über die als zweiten  
Kontakt wirkende Schicht 3 mit dem Lesekopf verbunden ist,  
wodurch die im Speichermedium 24 gespeicherte Information  
20 ausgelesen werden kann.

Fig. 12 zeigt eine Anordnung, mit der mehrere auf einem Sub-  
strat angeordnete erfindungsgemäße Halbleiterelemente vonein-  
ander entkoppelt werden können. In einem p-dotierten Substrat  
25 8, im Allgemeinen ein Siliziumsubstrat, ist ein n-dotierter  
Halbleiterbereich 26 implantiert. Auf diesem n-dotierten Be-  
reich 26 ist ein nichtmagnetischer Halbleiter 2 angeordnet,  
auf dem wiederum eine als erster Kontakt wirkende Schicht ei-  
nes semimagnetischen Materials aufgebracht ist. Der semima-  
30 gnetische Kontakt 1 wird über einen Metallkontakt 28 mit li-  
nearer Strom-Spannungskennlinie (ohmscher Kontakt) kontak-  
tiert. Weiter ist auf dem n-dotierten Bereich 26 ein Metall-  
kontakt 27 angeordnet, der so gewählt ist, dass eine Schott-  
ky-Diode an der Grenzfläche entsteht. Hierdurch ist ein  
35 Stromfluss zur Messung des Widerstandes nur in einer Richtung

möglich, so dass mehrere erfindungsgemäße Halbleiterelemente in einer aus Halbleiterspeichern bekannten Matrix mit Zeilen und Spaltenleitungen kontaktiert werden können und jeweils ein Halbleiterelement durch Ansteuern über eine Zeilen- und  
5 eine Spaltenleitung getrennt angesprochen werden kann.

In Fig. 12 ist nur eine der möglichen Ausführungsformen gezeigt. So kann beispielsweise der n-dotierte Bereich 26 auch direkt den nichtmagnetischen Halbleiter 2 bilden. Der semima-  
10 gnetische Kontakt 1 ist dann direkt auf dem implantierten Bereich 26 angeordnet. Ferner können auch ohmscher Kontakt 28 und Schottky-Kontakt 27 vertauscht werden, wodurch sich die Richtung des möglichen Stromflusses ändert. Schottky-Dioden zeigen in Durchlassrichtung einen vergleichsweise geringen  
15 Spannungsabfall. Es kann daher in Kombination mit dem erfindungsgemäßen Halbleiterelement noch ein magnetoresistiver Effekt beobachtet werden. Die Anordnung eignet sich insbesondere in Verbindung mit Speicherelementen, wie sie zum Beispiel oben anhand von Fig. 8 beschrieben wurden. Bei einer Verwen-  
20 dung des erfindungsgemäßen Halbleiterelements als Sensor wird wegen des durch die Diode bewirkten Empfindlichkeitsverlusts bevorzugt keine Diode verwendet.

Die Änderung des Widerstandes im erfindungsgemäßen magneto-  
25 elektrischen Halbleiterelement beruht auf einem neuen Effekt, der sich von den bisher bekannten magnetoresistiven Effekten, wie GMR oder AMR, grundlegend unterscheidet. Das magnetoresistive Halbleiterelement kann in eine Vielzahl von Bauelementen integriert werden und lässt sich in seinem Auf-  
30 bau in weiten Grenzen variieren.

---

Patentansprüche

1. Magneto-resistives Halbleiterelement, umfassend einen ersten Kontakt (1) und einen zweiten Kontakt (3), sowie eine  
5 zwischen erstem (1) und zweitem Kontakt (3) angeordnete Schicht (2) eines nicht magnetischen Halbleiters, wobei der erste Kontakt (1) aus einem semimagnetischen Material besteht.
- 10 2. Magneto-resistives Halbleiterelement nach Anspruch 1, wobei das semimagnetische Material ein Halbleiter ist.
3. Magneto-resistives Halbleiterelement nach Anspruch 1 oder 2, wobei zwischen erstem Kontakt und der Schicht des nicht  
15 magnetischen Halbleiters eine Tunnelbarriere angeordnet ist.
4. Magneto-resistives Halbleiterelement nach Anspruch 1, 2  
20 oder 3, wobei der zweite Kontakt (3) aus einem nicht magnetischen Material besteht.
5. Magneto-resistives Halbleiterelement nach Anspruch 1, 2  
oder 3, wobei der zweite Kontakt (3) aus einem semimagnetischen Material aufgebaut ist.
- 25 6. Magneto-resistives Halbleiterelement nach Anspruch 5, wobei zwischen dem zweiten Kontakt (3) aus einem semimagnetischen Material und der Schicht (2) aus dem nicht magnetischen Halbleiter eine Tunnelbarriere vorgesehen ist.
- 30 7. Magneto-resistives Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1, 2 oder 3, wobei der zweite Kontakt (3) aus einem ferromagnetischen Material aufgebaut ist.
8. Magneto-resistives Halbleiterelement nach Anspruch 7, wo-  
35 bei zwischen dem zweiten Kontakt (3) aus einem ferromagnetischen

schen Material und der Schicht aus dem nicht magnetischen Halbleiter eine Tunnelbarriere vorgesehen ist.

5 9. Magnetoresistives Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei das semimagnetische Material ein II-IV Halbleiter ist.

10 10. Magnetoresistives Halbleiterelement nach Anspruch 9, wobei der II-VI Halbleiter  $\text{Be}_x\text{Nn}_y\text{Zn}_{1-x-y}\text{Se}$  ist mit  $0 < x < 1$ ,  $0 < y < 1$  und  $0,0001 < y < 0,2$ .

15 11. Speicherelement umfassend ein magnetoresistives Halbleiterelement gemäss einem der Ansprüche 1 bis 10 und ein benachbart zum ersten Kontakt (1) angeordnetes ferromagnetisches Element (9).

12. Speicherelement nach Anspruch 11, wobei eine Schottky-Diode zur Entkopplung vorgesehen ist.

20 13. Feldeffekttransistor mit einer Source-Elektrode (14), einer Drain-Elektrode (15), einer Gate-Elektrode (12), wobei zumindest ein erster Kontakt (1) aus einem semimagnetischen Material vorgesehen ist, durch den spinpolarisierte Ladungsträger die Source-Elektrode (14) und/oder die Drain-Elektrode  
25 (15) injiziert bzw. extrahiert werden.

30 14. Bipolarer Transistor, umfassend einen als Emitter (19) wirkenden Abschnitt und einen als Kollektor (21) wirkenden Abschnitt und einen zwischen diesen angeordneten, als Basis (20) wirkenden Bereich, wobei zumindest ein erster Kontakt (1) vorgesehen ist, durch den spinpolarisierte Ladungsträger in den Emitter (19) und/oder aus dem Kollektor (21) injiziert bzw. extrahiert werden.



- 
15. Magnetischer Sensor, insbesondere Lesekopf zum Auslesen von in magnetischen Speichermedien gespeicherten Informationen, umfassend ein magnetoresistives Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 10, elektrische Zu- und Ableitungen zum ersten und zweiten Kontakt (1, 3) sowie eine mit den Zu- und Ableitungen verbundenen Messvorrichtung zur Messung der Änderung des elektrischen Widerstandes.
- 10 16. Verfahren zur Messung der Stärke eines Magnetfeldes, wobei das Magnetfeld auf einen Sensor einwirkt, in dem Ladungsträger in einem ersten Kontakt spinpolarisiert werden, die spinpolarisierten Ladungsträger in einen nichtmagnetischen Halbleiter injiziert werden, und die Ladungsträger aus dem nichtmagnetischen Halbleiter in einen zweiten Kontakt extrahiert werden und die Änderung des Widerstandes gegenüber einem Ausgangszustand gemessen wird.
- 15 17. Verfahren nach Anspruch 16, wobei der Ausgangszustand durch einen Widerstand des Sensors ohne Einwirkung eines Magnetfeldes gebildet wird.
- 20 18. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 oder 17, wobei die Ladungsträger Elektronen sind.

---

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein magnetoresistives Halbleiterelement, umfassend einen ersten Kontakt 1 und einen zweiten Kontakt 3, sowie eine zwischen erstem und zweitem Kontakt angeordnete Schicht 2 eines nicht magnetischen Halbleiters, wobei der erste Kontakt 1 aus einem semimagnetischen Material besteht. Als semimagnetisches Material werden stark paramagnetische Materialien verwendet, deren Elektronenspins ohne eine Wirkung eines äußeren Magnetfeldes keine Vorzugsrichtung aufweisen. Unter Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes werden die Elektronen im ersten Kontakt 1 spinpolarisiert. Hierdurch kommt es bei Anlegen einer Spannung zur Injektion spinpolarisierter Elektronen in den nichtmagnetischen Halbleiter 2. Dadurch kann im nichtmagnetischen Halbleiter nur noch einer der Spinkanäle für den Transport der Ladungsträger verwendet werden, so dass ein positiver magnetoresistiver Effekt erhalten wird.

20 Fig. 1

---

Bezugszeichen

- |    |    |                               |
|----|----|-------------------------------|
|    | 1  | erster Kontakt                |
|    | 2  | nicht-magnetischer Halbleiter |
| 5  | 3  | zweiter Kontakt               |
|    | 4  | Potential                     |
|    | 5  | Spinrichtung parallel         |
|    | 6  | Spinrichtung antiparallel     |
|    | 7  | Magnetfeld H                  |
| 10 | 8  | Substrat                      |
|    | 9  | ferromagnetisches Element     |
|    | 10 | Magnetisierung                |
|    | 11 | Magnetisierung                |
|    | 12 | Gateelektrode                 |
| 15 | 13 | Gatedielektrikum              |
|    | 14 | Source                        |
|    | 15 | Drain                         |
|    | 16 | Metallschicht                 |
|    | 17 | Metallschicht                 |
| 20 | 18 | Leitungskanal                 |
|    | 19 | Emitter                       |
|    | 20 | Basis                         |
|    | 21 | Kollektor                     |
|    | 22 | Metallschicht                 |
| 25 | 23 | Isolierschicht                |
|    | 24 | magnetisches Speicherelement  |
|    | 25 | Zellen                        |
|    | 26 | n-dotierter Halbleiterbereich |
|    | 27 | Metallkontakt                 |
| 30 | 28 | Metallkontakt                 |

1/10

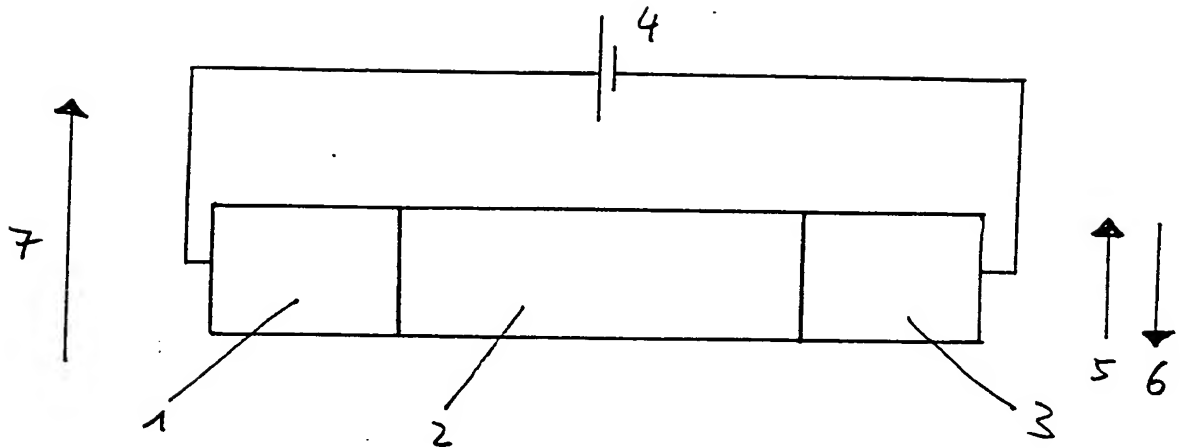


Fig 1

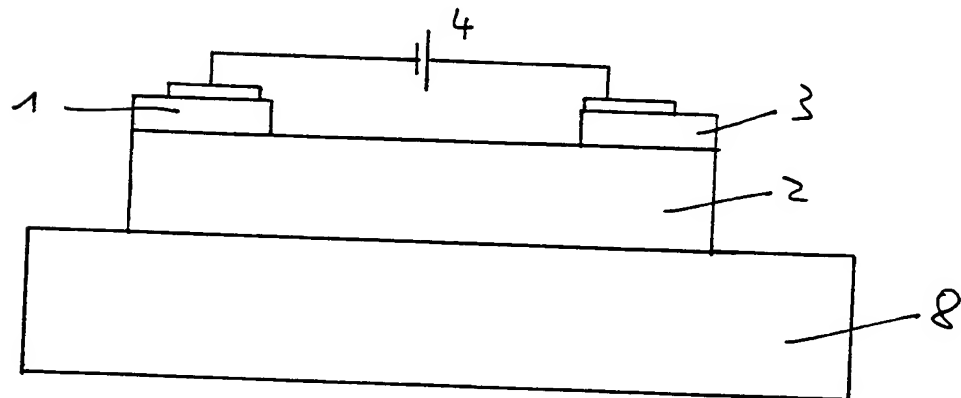


Fig 2

2/10

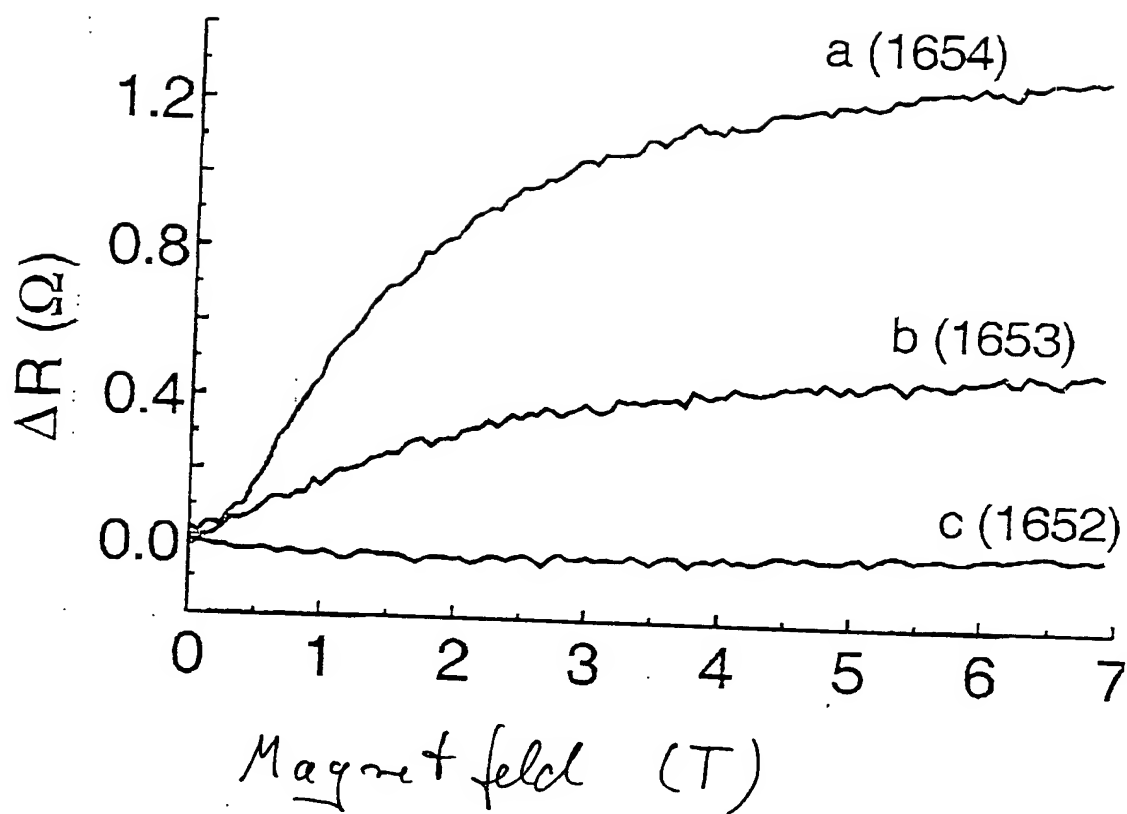


Fig. 3

3/10

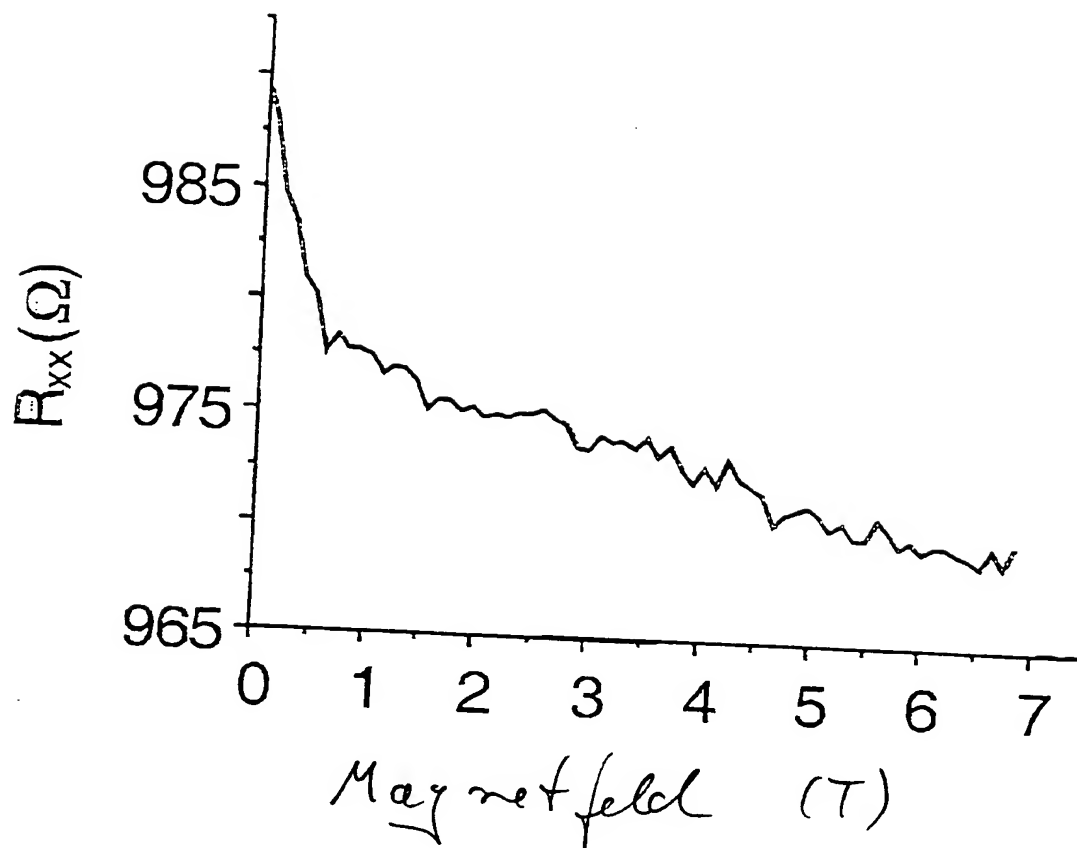


Fig. 4

4/10

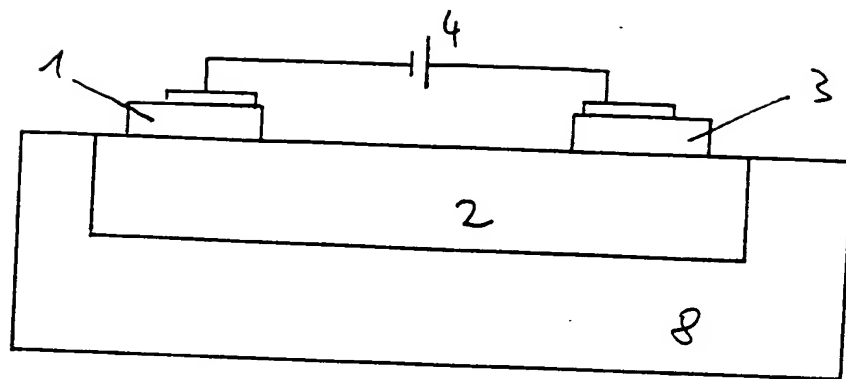


Fig 5

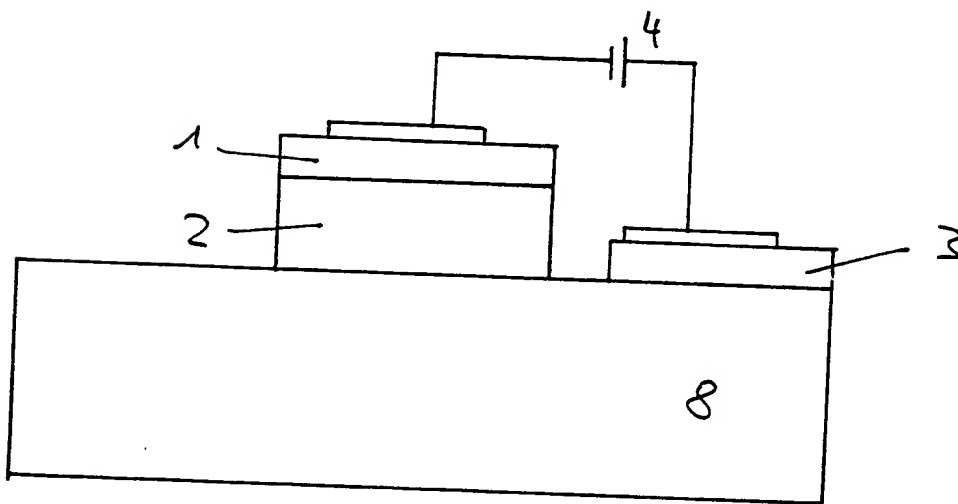


Fig 6

5/10

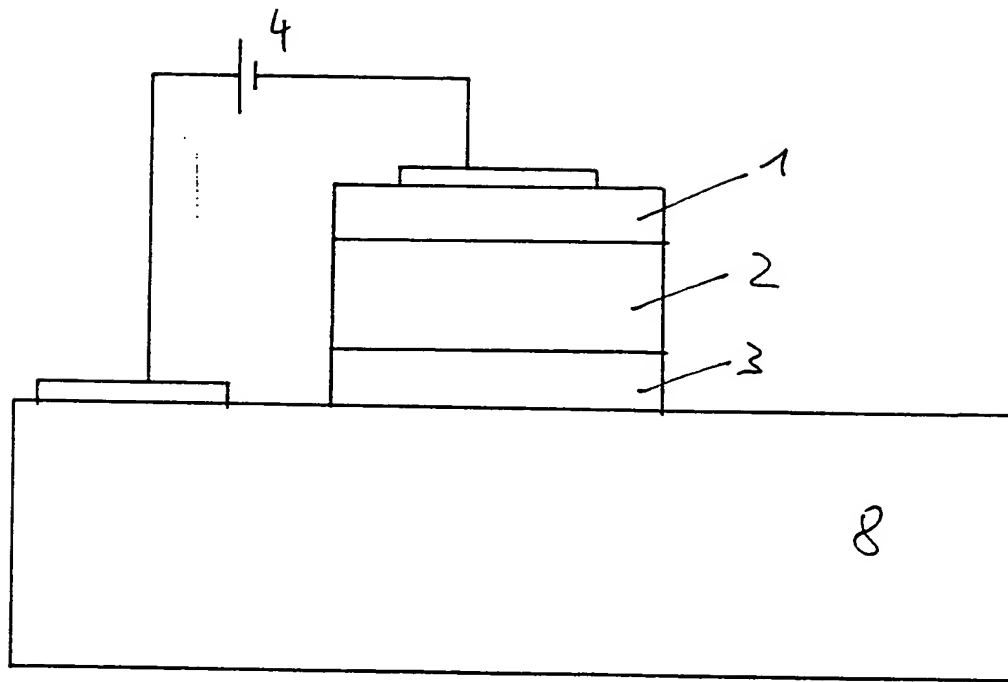


Fig. 7



6/10

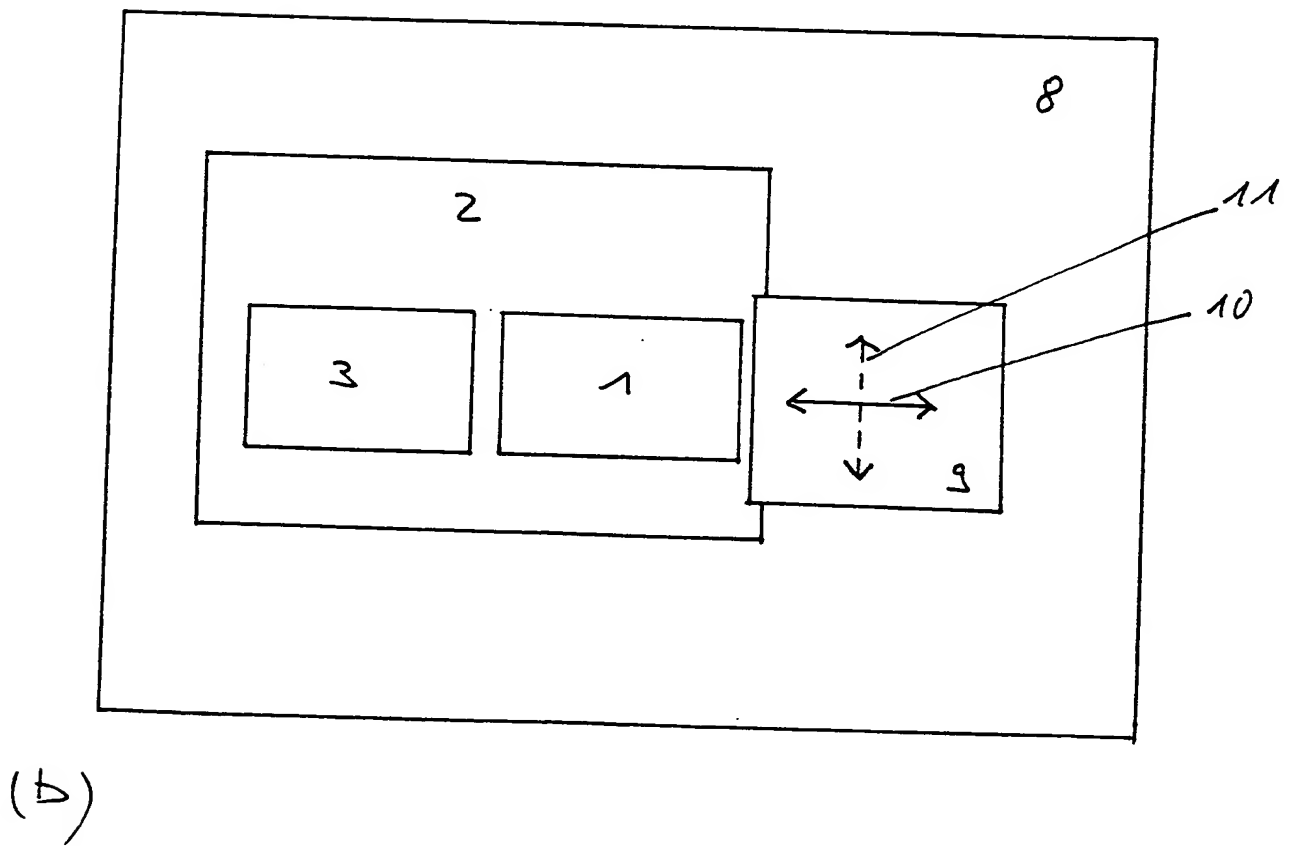
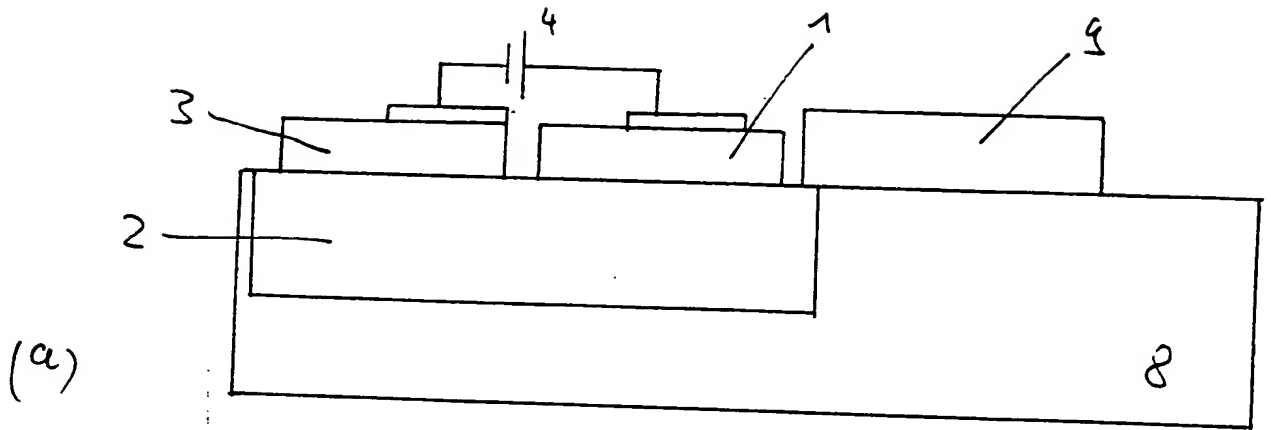


Fig. 8

7/10

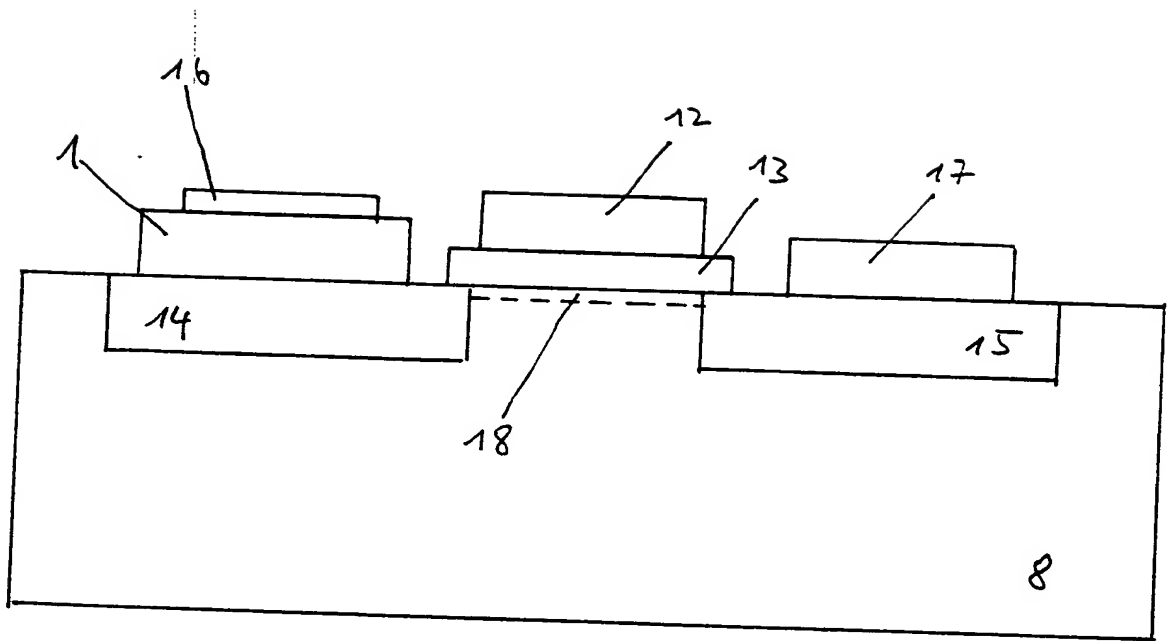


Fig 9

8/10

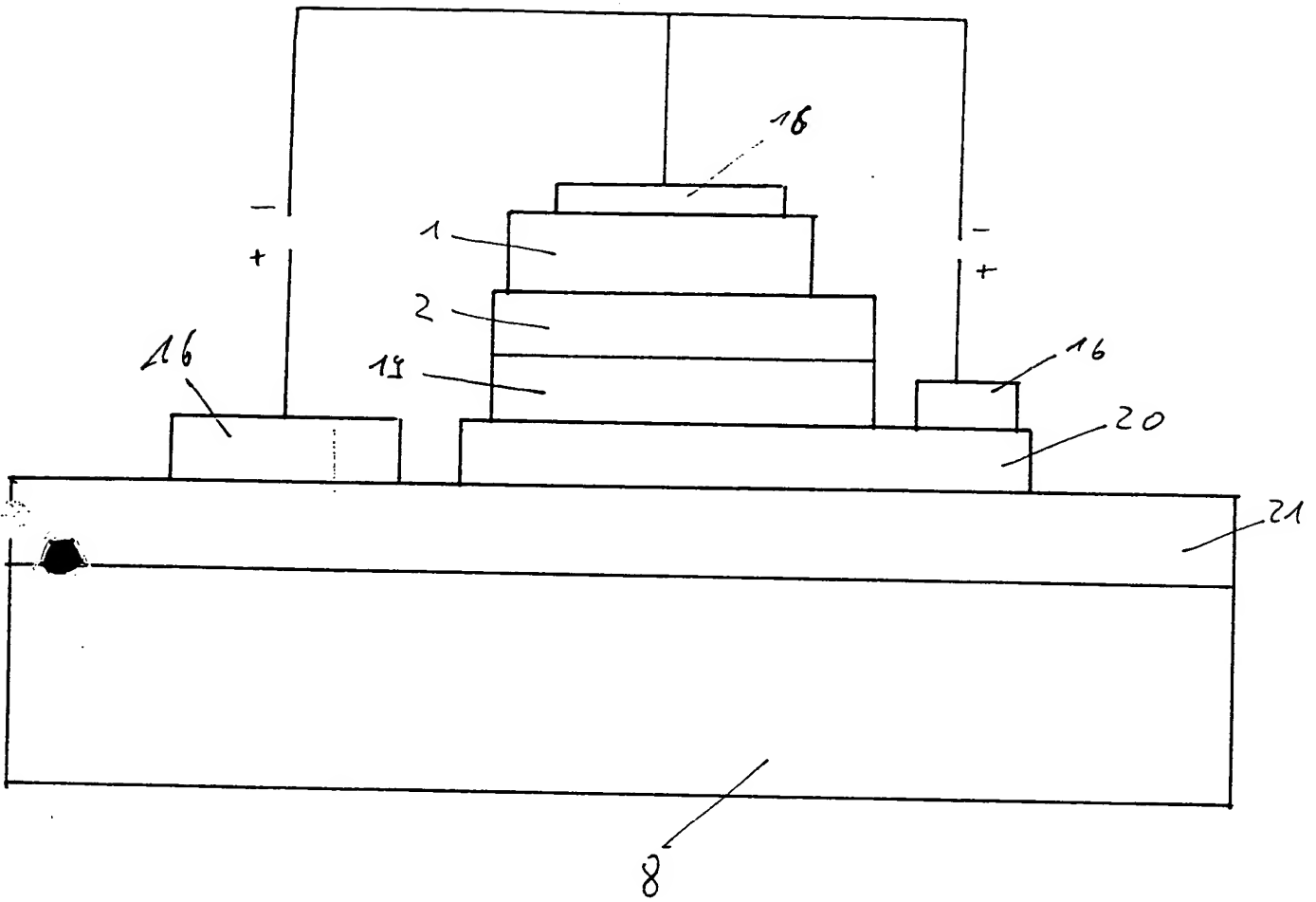


Fig. 10

9/10

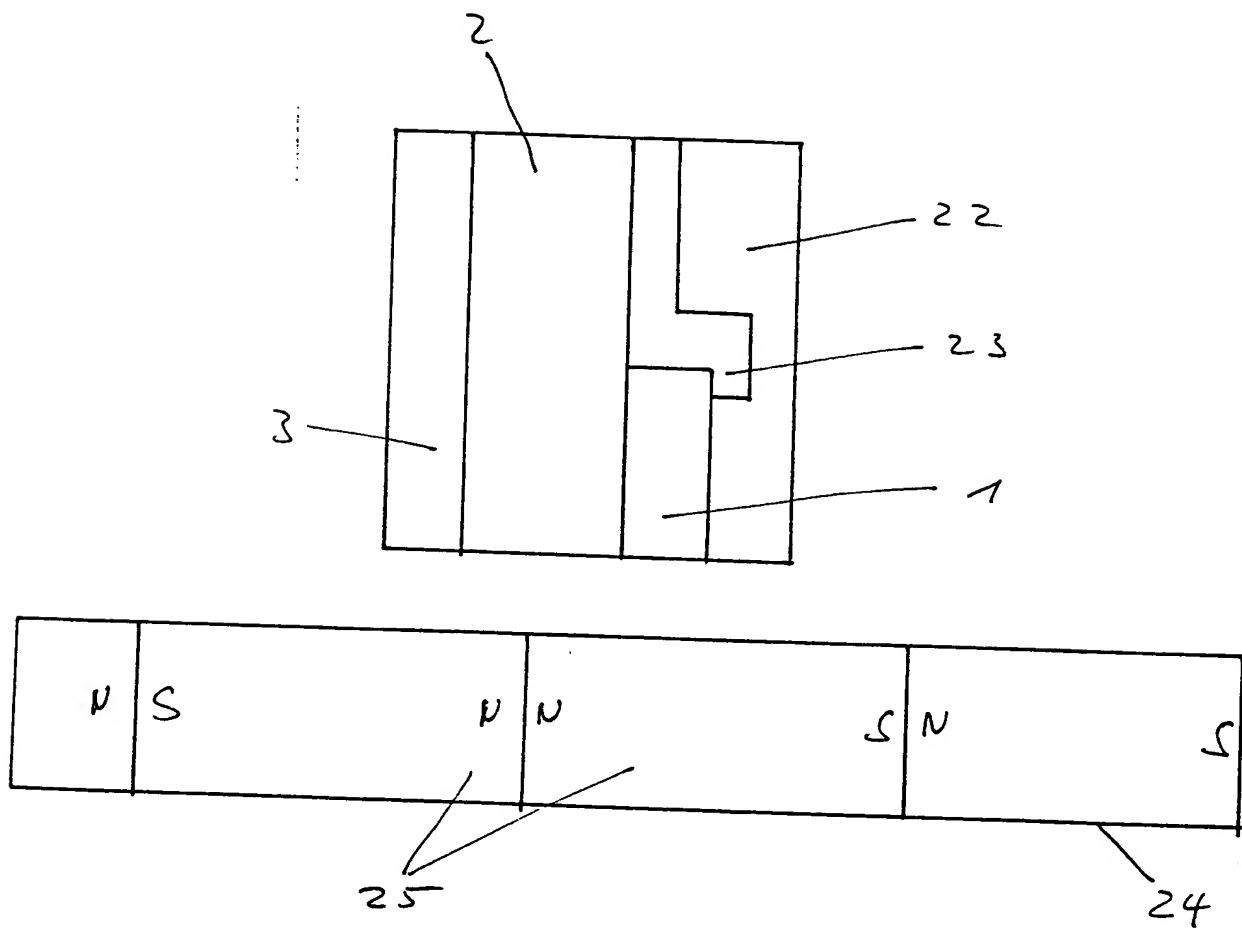


Fig 11

10/10

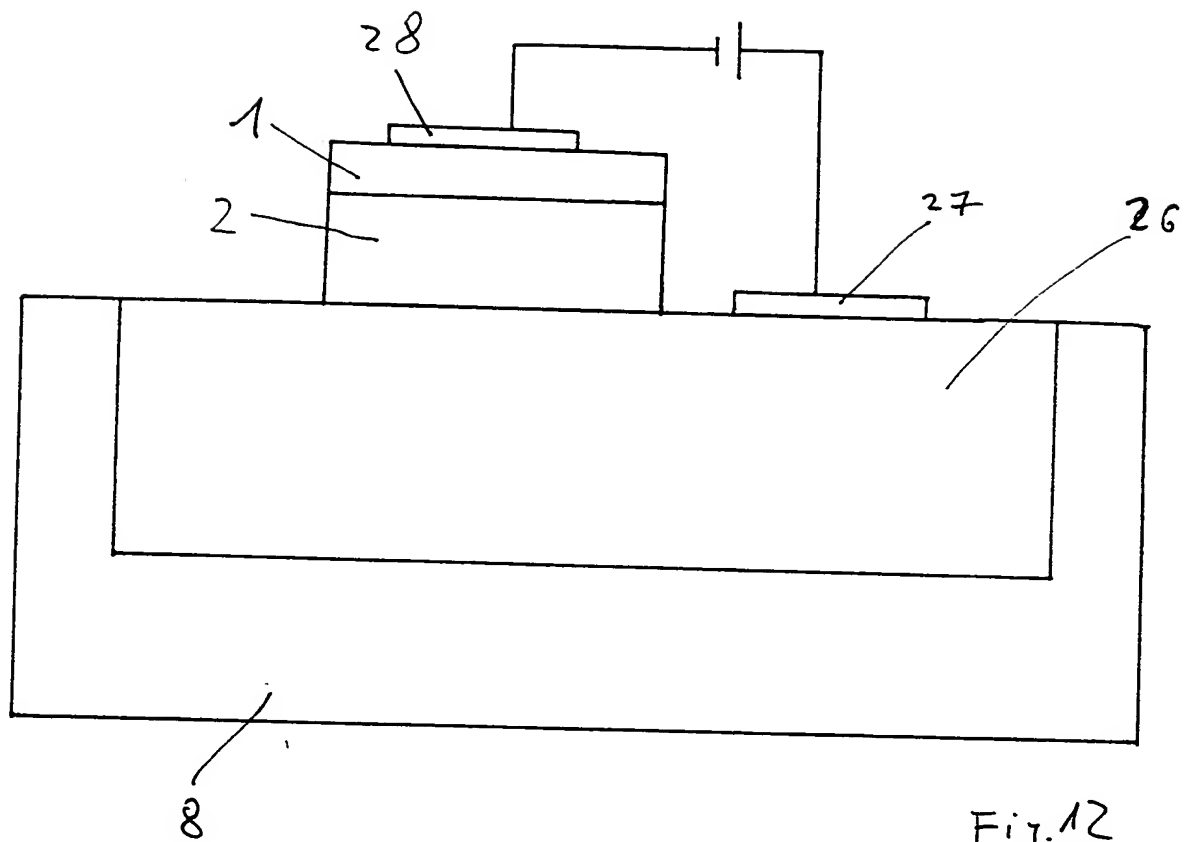


Fig. 12

Figur für die Zusammenfassung

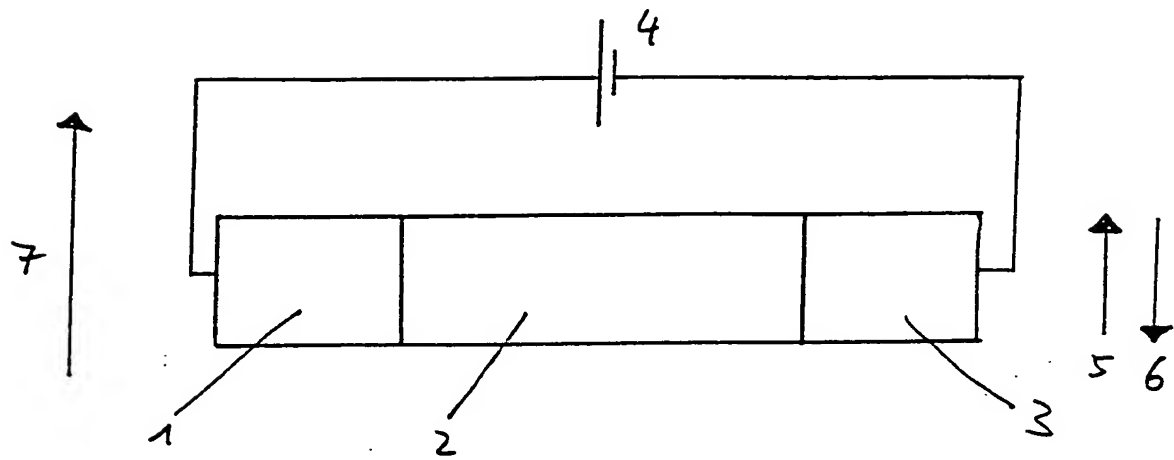


Fig 1